

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В МОЗАИЧНЫХ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ МИКРОБОЛОМЕТРИЧЕСКИХ ПРИЕМНИКАХ ИНФРАКРАСНОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНОВ ФОРМАТОМ ДО 3072×576 И БОЛЕЕ

© 2014 г. М. А. Демьяненко^{*}, канд. физ.-мат. наук; Д. Г. Есаев^{*}, канд. физ.-мат. наук;
А. Г. Клименко^{*}, канд. физ.-мат. наук; А. И. Козлов^{*}, канд. техн. наук;
И. В. Марчишин^{*}; А. Р. Новоселов^{**}, канд. техн. наук; В. Н. Овсюк^{*}, доктор физ.-мат. наук

^{*}Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН (ИФП СО РАН), г. Новосибирск,

^{**}Новосибирский филиал ИФП СО РАН “Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники”, г. Новосибирск

E-mail: kozlov@isp.nsc.ru

Рассмотрены конструктивно-технологические принципы создания мозаичных фотоприемников (МФП) гипербольшого формата на основе технологии близкой стыковки кремниевых кристаллов с неохлаждаемыми матричными микроболометрическими приемниками (ММБП) меньшего формата. Исследован и оптимизирован базовый блок технологических операций лазерного скрайбирования в составе прецизионной технологии близкой стыковки кристаллов с суммарным размером технологической части «слепой зоны» между краевыми фоточувствительными элементами соседних кристаллов ММБП не более 30 мкм. Синтезированы конструкция и схема кремниевого мультиплексора форматом 384×288, которые при изготовлении МФП форматом 3072×576 по разработанной технологии близкой стыковки, для инфракрасных микроболометров могут обеспечить эффективность преобразования изображений более 99%, а для микроболометров терагерцового диапазона до 100%.

Ключевые слова: мозаичный фотоприемник, микроболометр, кремниевый мультиплексор, инфракрасный диапазон, терагерцовый диапазон, скрайбирование, импульсный наносекундный лазер.

Коды OCIS: 040.3060, 110.3080, 130.5990.

Поступила в редакцию 17.07.2013.

Введение

Неохлаждаемые матричные микроболометрические приемники (ММБП) инфракрасного (ИК) и терагерцового (ТГц) излучения находят широкое применение в системах контроля, наблюдения, наведения и обработки визуализированной информации антитеррористического, гражданского и военного назначения.

Современные тенденции развития неохлаждаемых ММБП, так же как и охлаждаемых ИК фотоприемников, связаны с потребностью увеличения пространственного разрешения и дальности действия тепловизионных систем, изготавливаемых на базе этих фотоприемников, что определяет необходимость увеличения формата фотоприемной матрицы и уменьшения размеров фоточувствительных элементов (ФЧЭ) в этой матрице [1–5].

Прямое кардинальное увеличение количества ФЧЭ в однокристалльном ММБП ведет к значительному увеличению линейных размеров кристаллов кремниевых мультиплексоров (КМ), на основе которых создаются ММБП, и ограничивается неприемлемым уменьшением процента выхода годных кристаллов в процессе производства КМ и ММБП и, соответственно, неприемлемой ценой.

Наиболее перспективным путем кардинального увеличения формата ММБП, как, например, и фотоприемников на основе соединения кадмий–ртуть–теллур или на основе многослойных структур с квантовыми ямами, является мозаичный принцип построения, при котором несколько кристаллов субмодулей ММБП меньшего формата устанавливаются стык в стык друг другу на общем основании. Таким образом, с использованием технологии

близкой стыковки кристаллов создается мозаичный фотоприемник (МФП) гипербольшого¹ (до 3072×576 и более) формата. В настоящее время фирма “LSST Corporation” (США) намерена создать МФП, состоящий из 568 фотоприемников форматом 2048×2048 с шагом 10 мкм для использования в телескопах.

Ограничение области применения МФП связано с наличием “слепых зон”, обусловленных отсутствием ФЧЭ вдоль линии стыковки кристаллов субмодулей. При этом часть ИК или ТГц изображения теряется и снижается эффективность преобразования изображений в МФП². Очевидно, что при уменьшении размеров ФЧЭ в матрице фиксированного формата эффективность преобразования изображений МФП снижается, так как по мере уменьшения размеров ФЧЭ все большее число элементов изображения теряется в “слепой зоне” при одном и том же ее линейном размере.

В 2003 г. “слепая зона” составляла 7641 мкм (около 283 ФЧЭ) [3], в 2004 г. – 7128 мкм (264 ФЧЭ) [4] и в 2009 г. – около 367 мкм (35 ФЧЭ) [5]. Фирма «LSST Corporation» предполагает уменьшить размер “слепой” зоны до 100 мкм (10 ФЧЭ). В настоящее время основной областью применения МФП большого формата из-за больших размеров “слепых” зон является исследование объектов, медленно изменяющих свое пространственное положение, например в астрономии. В этом случае осуществляется многократное фотографирование объекта со смещением положения его изображения на МФП и последующим компьютерным сложением всех изображений.

Для наблюдения за объектами, которые достаточно быстро изменяют свое пространственное положение, необходимо увеличивать эффективность преобразования изображений, что достигается еще более значительным сокращением размеров “слепой” зоны. Наиболее известно конструктивно-технологическое решение для линейчатого МФП форматом 2×1500, разработанное фирмой “LETI” (Франция) [7]. Однако данный подход невозможно реализовать в матричных МФП из-за отсутствия места для смещения краевых ФЧЭ.

¹ Под термином “гипербольшой” понимается формат, хотя бы по одному из размеров превышающий известные (768×576 – стандарт аналогового ТВ вещания, так называемый полный формат; 384×288 – одна четвертая часть полного формата; 1920×1080 – цифровое телевидение высокой четкости, 2560×1440 – формат одного из продвинутых цифровых дисплеев).

² Эффективность преобразования изображений – это отношение количества работающих ФЧЭ в МФП к сумме ФЧЭ, потерянных в “слепых зонах” и работающих в МФП [6].

Технологическая часть “слепой зоны” определяется шириной области повреждения полупроводникового материала, возникающей в процессе разделения пластин на рабочие кристаллы, неровности краев стыкуемых кристаллов и зазора между ними. Понятие “ширина области повреждения полупроводникового материала” подразумевает следующее. При скрайбировании³ пластин лазерным излучением формируется канавка. Вокруг канавки образуется область полупроводникового материала, в которой изменяются его свойства (подробнее изложено в первой части настоящей работы). Форма дна канавки определяет линию раскола пластин. Для симметричной V-образной канавки расстояние между краем канавки на поверхности и линией раскола пластин равно полуширине канавки.

Дальнейшее уменьшение размеров технологической части “слепой зоны” возможно путем уменьшения размеров области повреждения полупроводникового материала и обеспечении стыковки кристаллов без зазора. При этом ширина технологической части “слепой зоны” между краевыми ФЧЭ соседних кристаллов в составе МФП вдоль горизонтальной линии стыковки кристаллов зависит от возможностей блока технологических операций прецизионного разделения пластин на рабочие кристаллы. Ширина “слепой зоны” вдоль вертикальной линии стыковки определяется размерами как технологической части “слепой зоны, так и топологической области размещения на кристалле реверсивного блока адресации (БА) субмодуля ММБП по соответствующей координате.

Целью настоящей работы является исследование конструктивно-технологических путей уменьшения потерь изображения в МФП гипербольшого формата. При этом необходимо, во-первых, разработать и оптимизировать прецизионную технологию близкой стыковки кремниевых кристаллов, обеспечивающую минимизацию технологической части «слепых зон» МФП за счет уменьшения областей повреждения и неровности краев стыкуемых кристаллов; во-вторых, исследовать специальную схмотехнику и создать на этой основе конструкцию и схему субмодуля ММБП, которые заданным образом минимизируют топологические размеры БА по соответствующей координате при размещении контактных площадок на одной стороне кристалла субмодуля.

³ Скрайбирование – основная технологическая операция процесса разделения пластин на отдельные рабочие кристаллы.

Часть I. Прецизионная технология близкой стыковки кремниевых кристаллов в МФП

Основные задачи, решаемые в первой части данной работы, – анализ повреждений полупроводниковой пластины при разных способах скрайбирования, а также исследование и оптимизация режимов базового блока технологических операций на основе лазерного скрайбирования пластин для уменьшения области повреждения материала с последующей разработкой прецизионной технологии близкой стыковки кристаллов в МФП.

Известно [8], что при механическом разрезании полупроводниковой пластины с помощью алмазных дисков или их скрайбировании алмазным резцом вокруг канавки формируется область повреждения материала, содержащая трещины и неровности рельефа. В этой области повышена плотность дислокаций и имеются остаточные напряжения. Размер области повреждения для кремниевой пластины составляет 20–30 мкм [8]. В процессе лазерного скрайбирования пластин вокруг канавки также образуется область повреждения материала. Для КМ, например при длине волны лазерного излучения 1,064 мкм, область повреждения имеет ширину не менее 35 мкм [9]. В отличие от механических способов разделения пластин на кристаллы при лазерном скрайбировании область повреждения материала можно уменьшить.

Выбор режима лазерного скрайбирования с минимальными областями повреждения

Для анализа повреждений кремниевой пластины при лазерном скрайбировании рассмотрим взаимодействие лазерного излучения, имеющего гауссоподобное изменение плотности энергии в пятне света на поверхности, с полупроводниковыми материалами. Из-за неравномерности плотности энергии лазерного излучения в пределах пятна на поверхности выделим три характерные кольцевые зоны (рис. 1): 1 – центральная область, в которой плотности энергии излучения достаточно для перехода материала в газообразное (парообразное) состояние; 2 – область, расположенная дальше от центра, в которой плотность энергии выше порога плавления; 3 – область на краях пятна излучения, в которой плотность энергии меньше порога плавления. При этом ширина

канавки не превышает размеров зоны 2 и зависит от доли расплава в выбросе материала [10]. Вне пределов пятна излучения имеется еще зона 4, в которой регистрируется повреждение полупроводникового материала. В [11] представлены результаты исследования электрических и физических свойств p-CdTe в зоне 4, а в [6] – результаты исследований на кремнии и соединении кадмий–ртуть–теллур по изменению вольт-амперных характеристик диодов, находящихся в зоне 4.

При облучении поверхности полупроводникового материала в пятне излучения последовательно происходят следующие процессы: разрушение кристаллической структуры материала (зоны 1, 2 и 3), плавление (зоны 1 и 2)

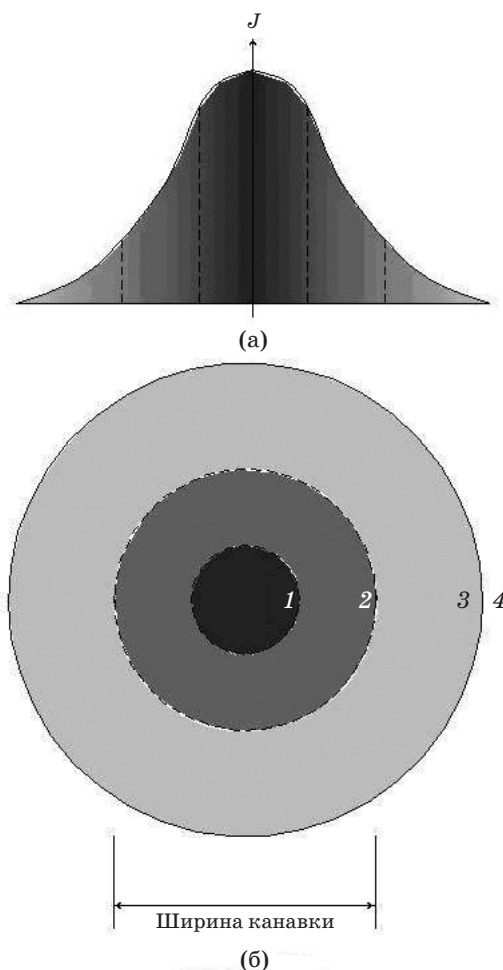


Рис. 1. Характерные области взаимодействия лазерного излучения с полупроводниковым материалом в пределах пятна на поверхности. а – схематичное распределение плотности J энергии излучения в пятне на поверхности обрабатываемого материала; б – условные границы распределения плотности энергии в пятне излучения.

и парообразование в зоне 1. В момент выброса материала из зоны 1 волна давления, обусловленная температурным коэффициентом линейного расширения пара, выдавливает расплав из зоны 2 на поверхность [6]. В зоне 3, в соответствии с литературными данными (для длин волн более 0,531 мкм), регистрируется увеличение концентрации дислокаций в кремнии и в других полупроводниковых материалах, например в CdTe [11], возникновение новых и исчезновение существующих электронных уров-

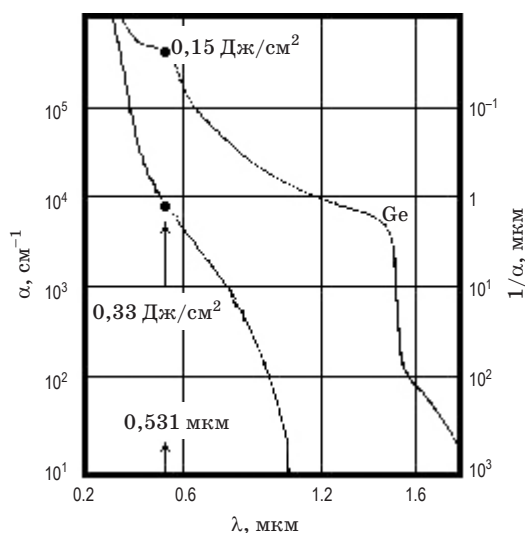


Рис. 2. Зависимости коэффициента поглощения (α) и глубины поглощения ($1/\alpha$) в полупроводниковом материале от длины волны лазерного излучения (λ) [14].

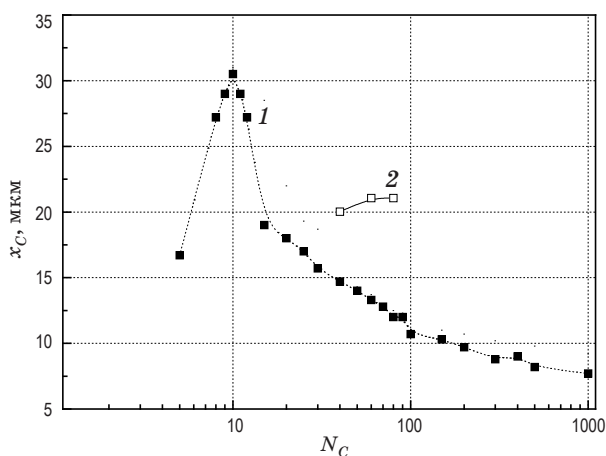


Рис. 3. Зависимость ширины канавки (x_c) от количества импульсов (N_c) лазерного излучения в каждую точку поверхности КМ для однопроходного (1) режима скрайбирования и предлагаемого многопроходного (2) режима.

ней в запрещенной зоне в Si [12] и изменение химического состава в соединении CdHgTe [13].

Отметим, что в зонах 3 и 4 регистрируются схожие изменения для разных полупроводниковых материалов. Уменьшить ширину поврежденного слоя можно путем экранирования поверхности кристаллов от излучения зоны 3, где плотность энергии недостаточна для расплава материала, и путем уменьшения протяженности зоны 4. Для этого необходимо осуществить оптимальный выбор источника лазерного излучения и режимов технологической операции лазерного скрайбирования. Известно, что пороговые плотности энергии плавления и парообразования в материале зависят от длины волны излучения. На рис. 2 показаны зависимости коэффициента поглощения и глубины поглощения для германия и кремния [14]. На графиках показаны плотности энергии начала плавления материалов на длине волны лазерного излучения 0,531 мкм. Из рисунка видно, что применение для скрайбирования длин волн более 0,531 мкм для кремния нецелесообразно из-за значительного увеличения глубины поглощения, а значит, и плотности энергии излучения, что увеличивает объем кремния, переходящего в парообразное состояние. Так, плотность энергии начала парообразования Si на длине волны 0,531 мкм составляет 4 Дж/см² в то время как на длине волны 0,248 мкм, только 1 Дж/см² [15]. Таким образом, для скрайбирования приборных пластин длина волны лазерного излучения не должна превышать 0,531 мкм.

При применении лазера с наносекундной длительностью импульсов расплав, возникающий в области воздействия на материал лазерного излучения, выдавливается на поверхность и боковые стенки канавки, при этом на поверхности формируется “буртик” высотой более 1–2 мкм, препятствующий гибридизации фотоприемников на основе соединения кадмий–ртуть–теллур или на основе многослойных структур с квантовыми ямами и увеличивающий технологическую часть “слепой зоны” на кристалле ММБП. На рис. 3 представлены данные о ширине канавки в зависимости от количества импульсов в каждую точку поверхности КМ для однопроходного режима скрайбирования и предлагаемого многопроходного режима при скорости движения лазерного луча относительно пластины 120 мкм/с. Плотность энергии лазерного излучения в эксперименте составляла около 3,6 Дж/см².

Как показали эксперименты, при использовании многопроходного режима лазерного скрайбирования формирование «буртика» на поверхности и сужения канавки не происходит.

Этот факт становится важным для еще более значительного уменьшения ширины поврежденного слоя. При скрайбировании необходимо формировать несимметричную V-образную канавку, одна сторона которой перпендикулярна поверхности. После раскола пластины по такой канавке значительно уменьшается ширина области повреждения, так как расстояние между краем канавки на поверхности и линией раскола не превышает 1–3 мкм. При применении однопроходного режима скрайбирования безопасное расстояние до ближайшего диода из-за перекристаллизованного материала на боковой стенке канавки больше на 25 мкм [16] в сравнении с многопроходным режимом. Следовательно, многопроходный режим скрайбирования лучше для минимизации безопасного расстояния до ближайшего диода. При многопроходном режиме скрайбирования лазерным излучением с длиной волны 0,334 мкм, частотой повторения импульсов 100 Гц и длительностью импульса 7 нс ширина области повреждения не превышает 5 мкм, а ширина области неровности краев состыкованных субмодулей ММБП равна ширине канавки (в данном случае около 20 мкм). Суммарная ширина технологической части «слепой зоны» составит около 30 мкм (рис. 4, 5).

На рис. 4 схематично представлена конструкция неохлаждаемого мозаичного ММБП ИК и ТГц спектральных диапазонов.

Для практической реализации такой конструкции МФП с близкой стыковкой кремниевых кристаллов ММБП был применен следующий способ. Кристаллы ММБП закреплялись на сапфировой плате с помощью эпоксидного клея. Предварительно в сапфировой плате были сделаны отверстия диаметром 2 мм для временной фиксации кристаллов. Плата устанавливалась под микроскопом на столик с подведенной вакуумной линией. Под микроскопом кристалл с нанесенным на непланарную (тыловую) сторону слоем эпоксидного клея толщиной менее 1 мм устанавливался на заданное место и с помощью вакуума удерживался до полной полимеризации клея. После этого аналогично устанавливался следующий кристалл ММБП.

На рис. 5 показаны примеры двух совмещенных кристаллов КМ (а) и ММБП (б). Канавка формировалась за 50 проходов. После скрайбирования приборная пластина была разделена на кристаллы и края двух кристаллов были совмещены. В случае, представленном на рис. 5а, скрайбирование осуществлялось по дорожкам реза.

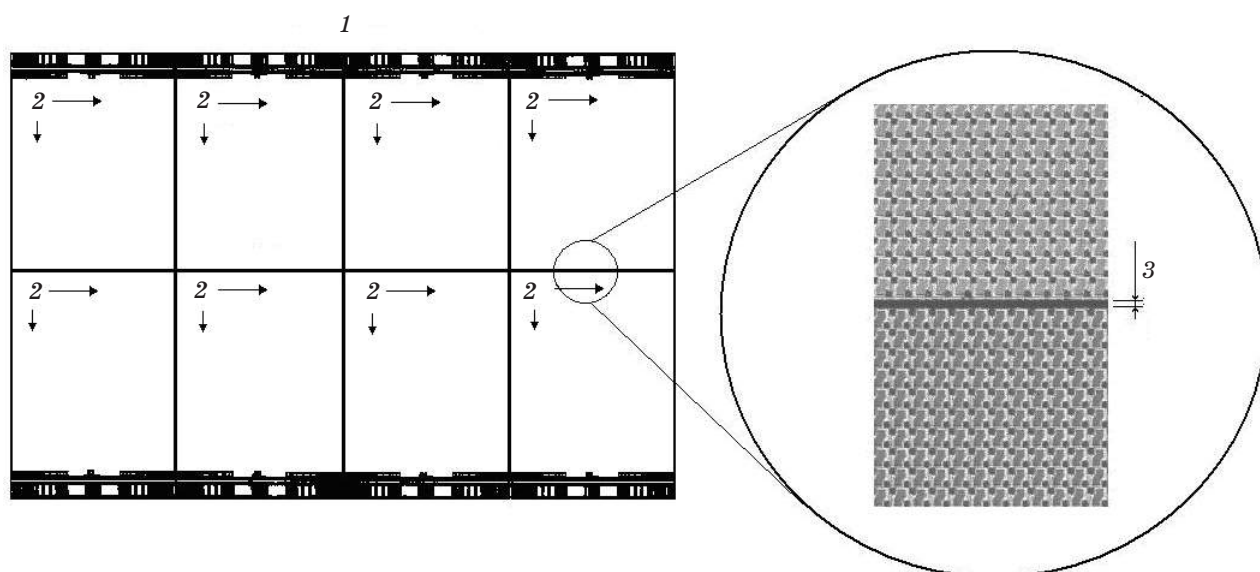


Рис. 4. Конструкция неохлаждаемого мозаичного ММБП ИК и ТГц спектральных диапазонов. 1 – мозаичный ММБП, 2 – субмодуль, 3 – технологическая часть «слепой зоны» (стрелки показывают единый принцип сканирования всего матричного МФП в целом).

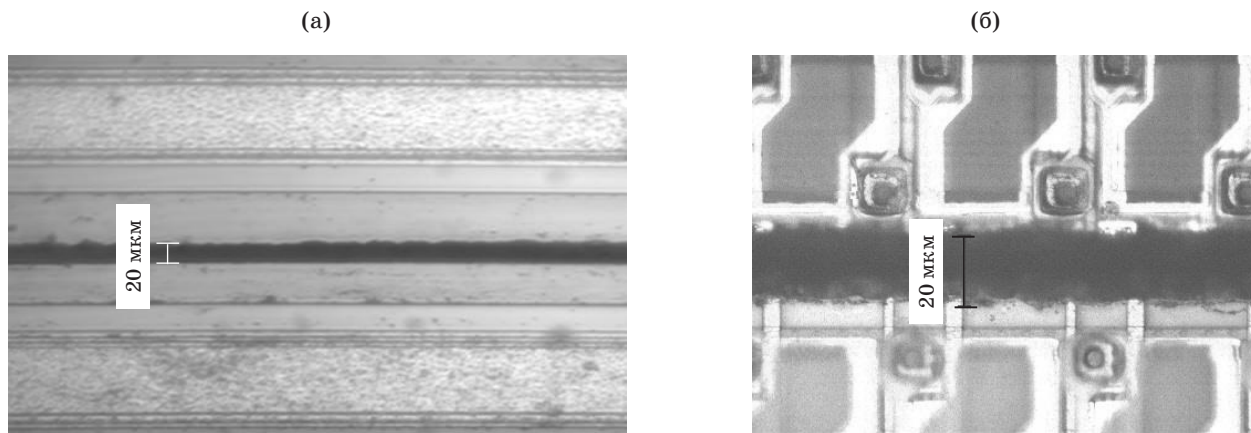


Рис. 5. Фотографии кристаллов КМ (а) и ММБП (б), близко состыкованных по экспериментальной технологии на основе разработанного сверхточного метода лазерного скрайбирования, с указанным размером области неровности края.

Итак, исследован и оптимизирован базовый блок технологических операций лазерного скрайбирования в составе прецизионной технологии близкой стыковки кремниевых кристаллов с суммарным размером областей повреждения и неровности края, или так называемой технологической частью «слепой зоны» не более 30 мкм.

Часть II. Оптимизация конструкции субмодуля КМ для МФП

Схемотехнический путь достижения предельной эффективности преобразования изображений в МФП заключается в разработке специальной конструкции и схемы субмодуля КМ. При этом главные задачи – синтезировать такую конструкцию кристалла КМ, которая обеспечивает размещение контактных площадок на одной стороне кристалла субмодуля, что необходимо для близкой стыковки произвольного количества субмодулей КМ по горизонтали, и минимизировать топологический размер ячейки БА перпендикулярно направлению сдвига информации при заданном размере его ячейки вдоль направления сдвига.

На основе анализа принципов построения схем считывания фотосигналов многоэлементных фотоприемников [17] разработана конструкция КМ, допускающая близкую стыковку кремниевых кристаллов субмодулей произвольного формата в мозаичных ММБП (рис. 6). В качестве БА для создания КМ можно использовать классический сдвиговый КМОП-регистр, топологическое исполнение которого

обеспечивает необходимые требования технологии близкой стыковки кристаллов по геометрическим размерам [18].

Однонаправленный сдвиговый регистр (ОНСР) [18] с минимальным размером топологической ячейки перпендикулярно направлению сдвига информации внутри БА при заданном размере ячейки вдоль направления сдвига содержит два инвертора и два передаточных вентиля, т.е. восемь МОП-транзисторов. Однако такой ОНСР не обеспечивает реверсивности сдвига содержащейся в нем информации, что принципиально необходимо для обеспечения единого принципа сканирования (слева направо и сверху вниз) всего матричного МФП в целом (см. рис. 4).

Схема вышеуказанного ОНСР может быть модернизирована посредством введения дополнительно двух передаточных вентилях, что позволяет расширить функциональные возможности известного регистра за счет обеспечения реверсивности, т.е. возможности изменения направления сдвига информации внутри регистра.

Топология ячейки модернизированного БА с реверсивной адресацией по вертикали при проектировании КМ по технологии 0,5 мкм КМОП 1Р 3М (КМОП-технология с проектными нормами 0,5 мкм, с одним уровнем поликремниевых затворов и с тремя уровнями металлической разводки) может занимать площадь кремниевого кристалла приблизительно 20×100 мкм² для ММБП ТГц спектрального диапазона с шагом ФЧЭ 100 мкм и приблизительно 26×51 мкм² для ИК ММБП с шагом ФЧЭ 51 мкм.

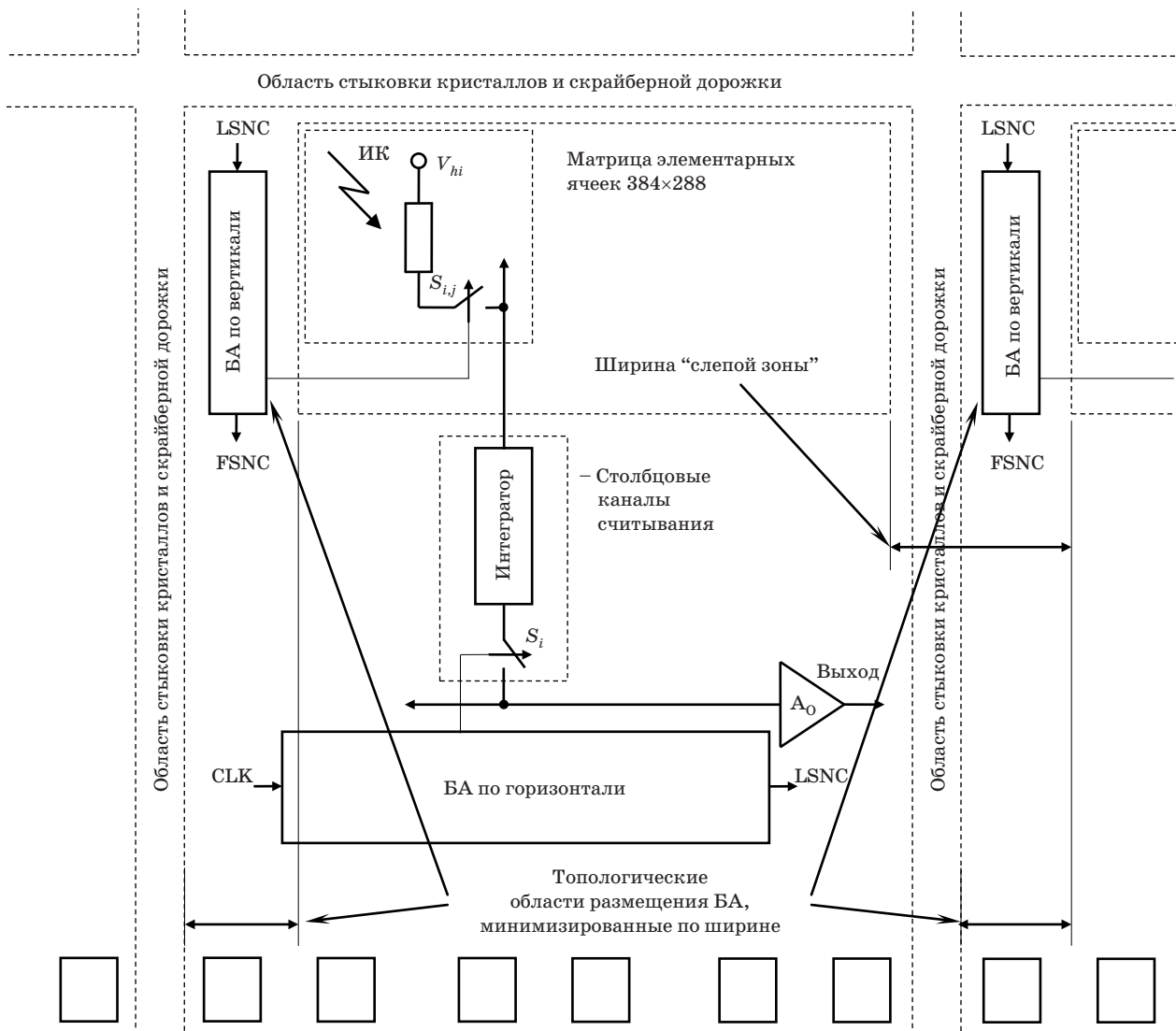


Рис. 6. Базовая конструкция субмодуля КМ для МФП (МБ – микроболومتر, V_{hi} – напряжение смещения МБ, $S_{i,j}$ – ключ адресации в элементарной ячейке, S_i – столбцовый ключ адресации, A_0 – выходной узел, CLK – тактовый сигнал, LSNC – строчный синхроимпульс, FSNC – кадровый синхроимпульс).

Синтезированная конструкция субмодуля КМ, в которой для выполнения операции адресации по вертикали применена схема предложенного реверсивного сдвигового регистра, обеспечивает:

1) минимальную площадь области потери фоточувствительности объединенной матрицы фотоэлементов при близкой стыковке кремниевых кристаллов в составе МФП,

при этом для ИК микроболметров потеря ФЧЭ вдоль вертикальной линии стыковки не превысит 2-х элементов,

для микроболметров ТГц диапазона за счет уменьшения (с последующей коррекцией) чувствительности краевых элементов можно обеспечить близкую стыковку без потери ФЧЭ вдоль вертикальной линии стыковки,

площадь области потери фоточувствительности объединенной матрицы фотоэлементов вдоль горизонтальной линии стыковки будет определяться только возможностями прецизионной технологии близкой стыковки кремниевых кристаллов, предложенной выше;

2) расположение внешних контактных площадок только на одной стороне кристалла субмодуля;

3) единый принцип сканирования всего мозаичного ММБП в целом.

Использование полученных экспериментальных (в плане разработки топологии) результатов построения схем считывания фотосигналов и разработанной технологии прецизионной стыковки кристаллов может обеспечить возможность создания мозаичных ММБП боль-

шого и гипербольшого формата с высокой эффективностью преобразования входных ИК и ТГц изображений. Для ИК спектрального диапазона в микроболометрическом МФП формате 3072×576 на основе субмодулей размерностью 384×288 эффективность преобразования может достигать 99.2 %, а в случае ТГц диапазона – до 100 %.

Итак, проанализирована конструкция КМ и предложена схема БА с реверсивной (двухнаправленной) адресацией по вертикали, которая обеспечивает минимальную площадь области близкой стыковки, расположение внешних контактных площадок только на одной стороне кристалла субмодуля и единый принцип сканирования всего МФП. Это позволяет осуществлять близкую стыковку двух субмодулей по вертикали, размер матрицы микроболометров по горизонтали ограничивается лишь экономическими соображениями и требованиями заказчиков.

Заключение

Рассмотрены практические конструктивно-технологические принципы создания МФП посредством близкой стыковки кремниевых кристаллов с использованием сверхточного метода лазерного скрайбирования. При этом определены режимы и длины волн (248 и 337 нм), импульсного наносекундного лазера, использованного при скрайбировании, как наиболее удовлетворяющие требованиям минимизации областей повреждения кремниевой подложки.

Размер зоны потери фоточувствительности объединенной матрицы фотоэлементов МФП

* * * * *

вдоль горизонтальной линии стыковки (технологической части “слепой зоны”) определяется только возможностями разработанной прецизионной технологии близкой стыковки кремниевых кристаллов и на данный момент не превышает 30 мкм. Заметим, что достигнутый к настоящему времени мировой результат составляет 100 мкм (фирма “LSST Corporation”).

Синтезированные конструкция и схема субмодуля КМ 384×288 в составе МФП гипербольшого (3072×576) формата, изготовленного на основе разработанной технологии, для микроболометров ТГц диапазона могут обеспечить близкую стыковку без потери ФЧЭ вдоль линий стыковки (эффективность преобразования изображений около 100 %), а для обычных ИК микроболометров потеря ФЧЭ вдоль вертикальной линии стыковки не превысит 2 элементов (эффективность преобразования приблизительно 99.2 %).

Таким образом, оптимизирован базовый блок технологических операций лазерного скрайбирования, разработана прецизионная технология близкой стыковки кристаллов в целом и исследованы принципы построения конструкции КМ, обеспечивающие создание мозаичных ММБП-изображений ИК и ТГц спектральных диапазонов форматом до 3072×576 и более с минимальной потерей или без потери фоточувствительных элементов соответственно.

Авторы выражают благодарность академику А.Л. Асееву за поддержку научно-исследовательских работ этого направления; В.В. Филипповой – за помощь при проектировании фотошаблонов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. М.: Физматкнига, 2005. 384 с.
2. Sparfke T., Beletic J. W. Infrared focal plane arrays for space applications // Optics and Photonics News. 2008. V. 19. № 6. P. 22–27.
3. Finger G., Beletic J. W. Review of the state of infrared detectors for astronomy in retrospect of the June 2002 // Workshop on Scientific Detectors for Astronomy. Proc. SPIE. 2003. V. 4841. P. 839–852.
4. Dorn R. J., Finger G., Huster G., Hans-Ulrich K., Jean-Louis L., Leander M., Manfred M., Jean-Francois P., Armin S., Stegmeier J., Moorwood A. F.-M. The CRIRES InSb megapixel focal plane array detector mosaic // Proceedings SPIE. 2004. V. 5499. P. 510–517.
5. Scowen P. A., Jansen R., Beasley M., Macenka S., Shaklan S., Calzetti D., Desch S., Fullerton A., Gallagher J., Malhotra S., McCaughrean M., Nikzad S., O'Connell R., Oey S., Padgett D., Rhoads J., Roberge A., Siegmund O., Smith N., Stern D., Tumblinson J., Windhorst R., Woodruff R., Spergel D., Sembach K. Design and Implementation of the Widefield High-Resolution UV/Optical Star Formation Camera for the THEIA Mission // 213 конференция американского Астрономического Общества, январь 2009. Опубликовано в Bulletin of the American Astronomical Society, V. 41. № 1.

6. *Новоселов А.Р.* Разработка высокоэффективных мозаичных фотоприемников на основе линеек фоточувствительных элементов // Автометрия. 2010. Т. 46. № 6. С. 106–115.
7. *Chamonal J.P., Mottin E., Audebert P., Ravetto M., Caes M., Chatard J.P.* Long linear MWIR and LWIR HgCdTe arrays for high resolution imaging // Proc. SPIE. 2000. V. 4130. P. 452–462.
8. *Готра З.Ю.* Технология микроэлектронных устройств. М.: Радио и связь, 1991. 528 с.
9. Промышленное применение лазеров / Под ред. Кебнера Г. М.: Машиностроение, 1988. 279 с.
10. *Narayan J., Young F.W.* Growth of dislocations during laser melting and solidification // Applied Physics Letter. 1979. V. 35. № 4. P. 330–332.
11. *Балдуллаева А., Власенко А.И., Кузнецов Э.И., Ломовцев А.В., Мозоль П.Е., Смирнов А.Б.* Возбуждение поверхностных акустических волн в кристаллах р-CdTe при воздействии импульсным лазерным излучением // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. № 8. С. 960–963.
12. *Mooney P.M., Young R.T., Karins J., Lee Y. H., Corbett J. W.* Defects in laser damaged silicon observed DLTS // Phys. Status Solidi A. 1978. V. 48. № 1. P. K31-K34.
13. *Afonso C.N., Alonso M., Neira J.L.H., Sequeira A.D., da Silva M.F., Soares J.C.* Pulsed laser induced effects on the HgCdTe surface // J. Vacuum Science Technology. 1989. A 7. № 6. P. 3256–3264.
14. Физика полупроводниковых приборов // Под ред. Зи С. М. М: Энергия, 1973. 655 с.
15. *Hong M.H., Yongfeng L.* Optical detection of laser plasma interaction during laser ablation // Proc. SPIE. 1999. V. 3618. P. 37–44.
16. *Novoselov A.R., Klimenko A.G.* Processes in semiconductor materials after laser cutting // Proc. SPIE. 2002. V. 4426. P. 150–153.
17. *Козлов А.И.* Анализ принципов построения схем кремниевых мультиплексоров для многоэлементных ИК фотоприемников // Автометрия. 2010. Т. 46. № 1. С. 118–129.
18. *Мурога С.* Системное проектирование сверхбольших интегральных схем. В 2-х кн. Кн. 1. Пер. с англ. / Под ред. Кисельникова В.М. М.: Мир, 1985. 288 с.